

Диффузия импульсного магнитного поля в проводящие среды

Марков Всеволод Михайлович

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Болтачев Грэй Шамилович, д.ф.-м.н.

sevvvich@gmail.com

Бурное развитие мощной импульсной техники требует аккуратного учета при проектировании силовых линий нестационарных процессов диффузии импульсного магнитного поля в различные проводящие среды: подводящие провода, коаксиальные линии, массивные индукторы и т.п. [1-3]. Когда характерное время нарастания (изменения) внешнего импульса (тока, напряжения, магнитного поля) составляет порядка 100 мкс, ток течет не по всей толще проводника, а по тонкому поверхностному слою (скин-слой). Например, для меди толщина скин-слоя в этих условиях составляет порядка 1 мм, для стали – около 3 мм. Характер распределения плотности тока вглубь проводника определяется дифференциальным уравнением в частных производных, описывающим распределение магнитного поля и однозначно связанной с ней плотности тока в проводящей среде. Данное уравнение имеет вид уравнения диффузии и называется уравнением диффузии магнитного поля [1,2]. К сожалению, решение уравнения диффузии аналитически возможно лишь в редких случаях простой геометрии и других серьезных упрощений, например, пренебрежение джоулевым нагревом, постоянство удельного сопротивления проводника и т.д.

В настоящем исследовании уравнение диффузии магнитного поля решается численно в рамках метода конечных разностей. В качестве тестовой задачи изучается радиальное распределение плотности тока и магнитного поля в аксиально симметричном случае — протяженный проводящий цилиндр (провод круглого сечения) с постоянной проводимостью. В качестве внешнего импульса используется либо «разряд колебательного контура» — импульс полного тока в виде полуволны синуса, либо «включение внешнего источника» — нарастание полного тока до некоторого заданного значения. Для данной задачи, позволяющей строгое аналитическое решение в виде разложения по функциям Бесселя, построены две разностные схемы: явная схема ВВЦП (вперед по времени, центральная по пространству) и неявная (назад по времени, центральная по пространству). Исследована сходимость данных схем, аналитически получено условие сходимости схемы ВВЦП. Построенное численное решение позволило оценить процесс тепловыделения и характер нарастания тока во внутренней области проводящего цилиндра. Вопросы тепловыделения важны для решения другой актуальной задачи — электрического взрыва проводников [2,4], а зависимость динамики нарастания тока от радиуса в перспективе может быть использована для конструирования коаксиальных линий для получения нужной формы входного импульса.

С целью управления формой импульса тока во внутренней части проводящего цилиндра исследована задача о диффузии магнитного поля в цилиндр с переменной проводимостью, т.е. когда удельное сопротивление является функцией радиуса. Для этой задачи на основе анализа системы уравнений Максвелла записано уравнение диффузии для напряженности электрического поля, поскольку для индукции магнитного поля записать единственное дифференциальное уравнение не удастся. Показано, что в случае исчезновения радиальной зависимости удельного сопротивления решение данной задачи совпадает с решением первой (тестовой) задачи. Проанализировано влияние радиальной зависимости удельного сопротивления на процесс тепловыделения и на характер нарастания тока во внутренней области проводника. Показана принципиальная возможность управления импульсом входного сигнала за счет подбора необходимой радиальной зависимости сопротивления, что на практике можно реализовать, например, за счет легирования материала.

Выполненные оценки процесса тепловыделения показали, что при небольших амплитудах внешнего импульса (магнитное поле меньше 2 Тл, ток ниже 2 кА) пренебрежение изменением удельной проводимости, связанной с джоулевым тепловыделением, вполне оправдано. Однако при более высоких амплитудах, которые наиболее актуальны для техники высоких импульсных полей [1,2], наряду с решением уравнения диффузии магнитного поля необходимо учитывать процессы нагрева и теплообмена, т.е. одновременно решать уравнение теплопроводности. В данный момент идет разработка разностных схем и программного кода для решения данных задач.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания 0389-2014-0006 при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 16-08-00277).

Список публикаций:

[1] Кнопфель Г. *Сверхсильные импульсные магнитные поля*. М.: Мир, 1972. - 392 с.

[2] Шнеерсон Г.А. *Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов*. Ленинград: Энергоиздат, 1981. - 200 с.

[3] Boltachev G.Sh., Nagayev K.A., Pararin S.N., Spirin A.V., and Volkov N.B. *Magnetic Pulsed Compaction of Nanosized Powders*. NY, Nova Science Publishers, Inc., 2010. - 86 p.

[4] Kotov Yu.A. *Electric Explosion of Wires as a Method for Preparation of Nanopowders* // *Journal of Nanoparticle Research*. 2003. V. 5, No. 5-6. P. 539.